

기술자료

자동차 비배기관에 의한 미세먼지 배출량 추정 및 추이 분석 - 타이어 및 브레이크 마모 배출량 중심으로 -

Estimation and Trend Analysis of Non-exhaust Particulate Matter Emissions from Vehicles - Focusing on the Emissions from Tire and Brake Wear -

최성우, 최수아, 이향경, 유 철*

국가미세먼지정보센터 배출량조사팀

Seongwoo Choi, Suah Choi, Hyangkyeong Lee, Chul Yoo*

Emission Inventory Management Team, National Air Emission Inventory and Research Center,
Cheongju, Republic of Korea

접수일 2023년 2월 17일
수정일 2023년 3월 29일
채택일 2023년 3월 29일

Received 17 February 2023

Revised 29 March 2023

Accepted 29 March 2023

*Corresponding author

Tel : +82-(0)43-279-4550

E-mail : s7424yoo@korea.kr

Abstract Non-exhaust emissions arising from tire and brake wear are receiving increasing attention as Particulate Matter (PM) reduction policy has expanded with the transition to eco-friendly fuels among vehicles. However, as non-exhaust sources (vehicles) are not included in the National Air Pollutant Emissions Inventory (NEI) of the Republic of Korea, the exact amounts of non-exhaust emissions are not able to be identified. This study estimates the TSP, PM-10, and PM-2.5 emissions from tire and brake wear based on EEA's estimation method, and analyzes the trend of non-exhaust emissions. In 2019, when applying Tier 2 methodology, the air pollutant emissions from the wear of tires and brakes in the Republic of Korea comprised 11,418 tons of TSP, 9,046 tons of PM-10, and 4,622 tons of PM-2.5. The 2019 NEI shows national exhaust PM-2.5 emissions of vehicles from are in a downward trend while non-exhaust emissions of PM-2.5 is increasing compared to 2015 figures. The study's results would allow figuring out the current status of non-exhaust PM-2.5 emissions from, for example, tire and brake wear, and would be used as the base data for establishing policies aiming to emphasize the importance of emissions management and to reduce the emissions.

Key words: NEI, CAPSS, Non-exhaust, Tire wear, Brake wear

1. 서 론

2019년 11월, 정부는 '16년 대비 초미세먼지의 연평균 농도 35% 이상 저감('16년 $26 \mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow$ '24년 $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 목표로 '미세먼지 관리 종합계획(이하 종합계획)'을 발표 및 시행하였다. 종합계획은 '산업', '수송(도로, 비도로)', '발전' 및 '농업·생활' 등 4개 부문으로 분류하여 미세먼지 국내 배출 감축 정책을 수립하였다. 이 중 수송부문 저감 대책으로는 노후 경유차의 퇴출 가속화와 저공해차(전기·수소차 등) 보급 확대를 통

한 배기관(Exhaust) 미세먼지 배출 저감 대책과 저마모 타이어 개발 및 상용화 등 비배기관(Non-exhaust) 미세먼지 배출을 저감하기 위한 대책도 담고 있다(MOE, 2019).

최근 '종합계획'과 같이 자동차에 의한 오염물질 배출을 관리하기 위해 제작·운행차의 배출허용기준 강화와 더불어 전기·수소차와 같이 친환경 자동차 보급 확대 등의 연료전환을 통한 저감대책이 확대되고 있다. 이에 연료 연소에 의한 자동차 배기관 배출 함께 타이어 및 브레이크 마모 등 비배기관에 의한 미세먼

지 배출의 관심 또한 높아지고 있다(Choi and Kim, 2022; Kang and Kim, 2022, 2021; Son and Hwang, 2021; Woo *et al.*, 2020; Mathissen *et al.*, 2012).

타이어 및 브레이크 마모 입자가 대기 중으로 비산될 경우 바람 및 강우 등에 의해 하천 또는 바다에 유입되어 생태계에 영향을 미칠 수도 있으며(Baensch-Baltruschat *et al.*, 2020; Leads and Weinstein, 2019), 인체 건강에 직·간접적으로 유해한 영향을 나타낼 수 있다(Zhao *et al.*, 2015; Cassee *et al.*, 2013). 또한 추후 도로이동오염원의 오염물질 배출량은 배기관보다 비배기관의 배출량의 비율이 높아질 것으로 예상되어 해당 부문의 배출 관리 필요성이 지속적으로 제기되고 있다(Harrison *et al.*, 2021; UK AQEG, 2019; Timmers and Achten, 2016; Grigoratos and Martini, 2014; Borken-Kleefeld and Ntziachristos, 2012).

현재 미국 EPA (Environmental Protection Agency)와 유럽 EEA (European Environment Agency)의 경우 별도의 타이어 및 브레이크 마모 배출원과 배출량 산정 방법을 구축하고 있으며, EEA의 경우 국가별 배출량을 산정하여 공개하고 있다. 그러나 현재 국가 대기 오염물질 배출량 통계에는 현재 자동차 배기관에 의한 배출량과 자동차 주행으로 도로 표면의 먼지가 비산되어 발생하는 ‘도로재비산먼지’ 부문 배출량만 산정 및 공개하고 있으며, 비배기관에 의한 배출 통계는 누락되어 있다.

국가 대기오염물질 배출량 통계는 환경부 국가미세먼지정보센터에서 대기정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System, 이하 CAPSS)을 기반으로 도로 이동오염원 등 13개 대분류 배출원에서 배출되는 9가지 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM-10, PM-2.5, BC, VOCs, NH₃)을 대상으로 1999년부터 연간 국가 배출량을 매년 공표하고 있다(NAIR, 2022b). 실효성 높은 대기질 개선 정책 수립·이행·평가를 위해서는 정확한 대기오염물질 배출량 통계 구축이 중요하며, 이를 위해 누락 배출원 발굴, 배출량 산정 방법·배출계수·활동도 개선 등의 지속적인 개선 연구가 필요하다(Choi *et al.*, 2022, 2021, 2020; Yeo *et al.*, 2019).

본 연구에서는 배출 관리의 중요성이 높아지고 있으나 현재 국가 배출량 통계에 누락되어 있는 자동차 타이어 및 브레이크 마모에 의한 TSP (총부유먼지, Total Suspended Particles), PM-10 (미세먼지, 입자의 지름이 10 µm 이하인 먼지) 및 PM-2.5 (초미세먼지, 입자의 지름이 2.5 µm 이하인 먼지) 배출량을 추정하였다. 또한 2015년부터 2019년까지 자동차 배기관·비배기관 배출량 추이 분석을 통해 비배기관에 의해 배출되는 입자상 물질의 관리 필요성과 이를 저감하기 위한 대기환경 정책 수립에 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

현재 자동차 타이어 및 브레이크 마모에 의한 국가 배출량 산정 방법 및 배출계수의 경우 별도로 구축되어 있지 않고 있다. 국외의 경우 미국 EPA의 MOVES (MOTOR Vehicle Emission Simulator) 모델을 활용한 산정 방법과 유럽 EEA의 EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook에 따른 산정 방법이 대표적이다. EPA MOVES 모델의 경우 도로 경사도, 시간 단위의 차량 속도 및 비출력 (VSP, Vehicle Specific Power) 등을 고려한 주행 상태별 (Operating Mode) 배출계수 (g/hr)를 도출하여 배출량을 산정하는 시스템이다. 그러나 현재 국내에서는 VSP 등을 고려한 MOVES 모델을 활용하기에 도로유형 등 활동자료의 한계가 있으므로, 주행거리 단위의 오염물질별 배출계수 (g/km)와 차량 하중 및 속도 보정계수를 적용하여 배출량을 산정하는 EEA의 배출량 산정 방법을 활용하였다.

유럽 EEA의 타이어 및 브레이크 마모에 의한 미세먼지 배출량 산정 방법은 Tier 1 방법론과 Tier 2 방법론이 있으며, 방법론에 따른 수식은 각각 식 1, 식 2와 같다. Tier 1 방법론의 경우 자동차 차종별 대수, 주행거리 및 배출계수를 활용하여 배출량을 산정하며, Tier 2 방법론의 경우 Tier 1 방법론에 주행속도별 보정계수를 적용하여 배출량을 산정한다. 본 연구에서는 차

종별 등록대수, 주행거리를 활용한 Tier 1 방법론과 Tier 1 방법론에 속도별 보정계수를 활용한 Tier 2 방법론을 인용하여 방법론별로 각각 배출량을 산정하였다.

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{ij} \quad \text{Tier 1 (Eq. 1)}$$

TE: Emissions from tire and brake wear by vehicle (g)

N_j : Number of vehicles in category j

M_j : Mileage driven per vehicle in category j (km)

EF_{ij} : Mass emission factor for pollutant i and vehicle category j (TSP · PM-10 · PM-2.5, g/km)

*Source: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 (EEA, 2022)

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{TSPsj} \times f_{s,i} \times S_s(V) \quad \text{Tier 2 (Eq. 2)}$$

TE: Emissions from tire and brake wear by vehicle (g)

N_j : Number of registered vehicles in type j

M_j : Mileage driven per vehicle in category j (km)

EF_{TSPsj} : TSP mass emission factor for vehicles in cate-

gory j (g/km)

$f_{s,i}$: Mass fraction of TSP that can be attributed to particle size class i

$S_s(V)$: Correction factor for a mean vehicle travelling speed V

*Source: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 (EEA, 2022)

2.1 타이어 및 브레이크 마모 배출계수

본 연구에서 타이어 및 브레이크 마모에 의한 오염 물질 배출량 산정 시 적용하는 배출계수는 EEA에서 제안한 배출계수를 인용했으며, 표 1과 같다. EEA Tier 1 방법론의 배출계수는 타이어 마모와 브레이크 마모의 구분 없이 TSP, PM-10 및 PM-2.5 각각 통합된 배출계수를 제시했다. Tier 2 방법론의 경우 타이어 마모와 브레이크 마모를 구분한 배출계수를 제시했으며, PM-10과 PM-2.5는 TSP 배출에 의한 질량 분율 형태로 제시되어 있다. ‘대형 차량 (Heavy-duty vehi-

Table 1. Air pollutant emission factors for tire and brake wear from road transport.

(unit: g/km)

Source category	Tier 1 method			Tier 2 method					
	TSP	PM-10	PM-2.5	TSP		PM-10**		PM-2.5**	
	Tire and brake wear combined			Tire	Brake	Tire	Brake	Tire	Brake
Two-wheel vehicles	0.0083	0.0064	0.0034	0.0046	0.0037				
Passenger cars	Internal Combustion Engine (ICE)			0.0107	0.0122				
	Hybrid Electric Vehicle (HEV)	0.0229	0.0184	0.0093	0.0111	0.0097			
	Battery Electric Vehicle (BEV)			0.0116	0.0034	0.60	0.98	0.42	0.39
Light-duty trucks	N1-I				0.0122				
	N1-II, III	0.03427	0.0271	0.0139	0.0169				
Heavy-duty vehicles	0.0777	0.0590	0.0316	$EF = \frac{N_{axle}}{2} \times LCF \times EF_{TSP,PC(ICE)}$ $LCF = 1.41 + (1.38 \times LF)$ $EF = 1.956 \times LCF \times EF_{TSP,PC(ICE)}$ $LCF = 1 + 0.79 \times LF$					

*Source: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 (EEA, 2022)

**PM₁₀, PM_{2.5}: Mass fraction of TSP

cles)’ 부분의 경우 ‘승용차(Passenger cars (ICE))’의 TSP 배출계수에 하중 보정계수(LCF, Load Correction Factor)가 적용된다. LCF를 도출할 때의 LF (Load Factor)는 0~1 범위 내에서 완전히 적재된 상태의 차량을 1로 적용한다. 본 연구에서는 ‘대형 차량(Heavy-duty vehicles)’의 화물이 적재된 차량의 하중을 특정하기에 활동도 수집에 한계가 있어 중간값인 0.5로 적용하였다. 또한 타이어 마모 배출계수 도출 시 차량의 차축 수(N_{axle})의 경우 국내 도로 교통량 통계에서 차종별 차축 수를 고려하여 표 3과 같이 적용하였다.

Tier 2 배출량 산정 방법론(식 2)에 따른 자동차 주행 속도별 타이어 및 브레이크 마모 배출 보정계수($S_s(V)$)는 표 2와 같다. 타이어 마모와 브레이크 마모 각각 ‘40 km/h 미만’, ‘40 km/h 이상 90 km/h 이하’, ‘90 km/h 초과’의 3개 주행속도 구간별로 보정계수가 제시되어 있다. 본 연구에서는 자동차 차종별 주행속도별 주행거리를 구축한 후 보정계수를 적용하여 Tier 2 방법론 기준으로 미세먼지 배출량을 산정하였다.

Table 2. Speed correction factors for tire and brake wear particle emissions.

Vehicle speed (km/h)	Tire wear	Brake wear
$V < 40 \text{ km/h}$	1.39	1.67
$40 \text{ km/h} \leq V \leq 90 \text{ km/h}$	$-0.00974 \times V + 1.78$	$-0.0270 \times V + 2.75$
$V > 90 \text{ km/h}$	0.902	0.185

*Source: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 (EEA, 2022)

Table 3. Vehicle types used in CAPSS corresponding with EEA's emission factors by vehicle type.

EEA source category		CAPSS source category
Two-wheel vehicles		Two-wheeled vehicles
Passenger cars		Passenger cars, Taxis, Vans (compact · small-sized), RV
Light-duty trucks	N1-I	Freight cars (small-sized)
	N1-II, III	Freight cars (middle-class)
Heavy-duty vehicles*		Vans (middle-class ₍₂₎ · full-sized ₍₂₎ · special ₍₂₎), Buses ₍₂₎ , Freight cars (middle-class ₍₃₎ · full-sized ₍₄₎ · special ₍₃₎), Dump truck ₍₃₎ , Concrete mixer truck ₍₃₎ , Special motor cars (tow truck ₍₂₎ , wrecker ₍₂₎ , others ₍₂₎)

*Numbers in parentheses refer to the number of axles used in deriving tire wear emission factors

EEA의 타이어 및 브레이크 마모 배출계수에 따른 차종 분류는 표 1과 같이 ‘이륜차(Two-wheel vehicles)’, ‘승용차(Passenger cars)’, ‘소형 트럭(Light-duty trucks)’, ‘대형 차량(Heavy-duty vehicles)’으로 분류되어 있다. 그러나 현재 CAPSS 분류체계의 경우 국내 자동차관리법을 기반으로 차종별 오염물질 배출 특성을 고려하여 승용차, 승합차 및 화물차 등 8개 차종 중심의 중분류와 경·소·중·대형 등 규모 중심의 소분류로 별도 구축하여 대기오염물질 배출량을 산정하고 있다. 표 1의 차종 분류와 CAPSS의 차종 분류 간에 정확하게 매칭하기에는 한계가 있으므로, EEA의 차종별 정의에 따라 표 3과 같이 가정하여 CAPSS 차종을 매칭한 후 EEA와 CAPSS 분류체계별로 배출량을 산정하였다.

2.2 자동차 등록대수 및 주행거리 구축 방법

타이어 및 브레이크 마모 배출량을 산정하기 위한 활동도는 자동차 차종별 총 주행거리(Vehicle kilometers traveled, 이하 VKT)이다. 환경부 국가미세먼지정보센터에서는 승용차, 화물차 등 자동차에서 배출되는 대기오염물질 배출량을 산정하기 위해 매년 시군구별 차종별 등록대수 및 주행거리를 구축하고 있으며(NAIR, 2022a; NIER, 2019), 이를 위해 활용한 통계 자료는 다음과 같다.

자동차 등록대수의 경우 한국자동차산업협회(Korea Automobile Manufacturers Association, 이하 KAMA)의 제작사별, 차종별, 차명별, 차령별 등록현황 자료를 활

용하였으며, 입수된 자료의 형태는 표 4와 같다. 한편 이륜차 등록대수의 경우 국토교통부의 ‘이륜차 신고 현황’을 활용하였다.

자동차 주행거리의 경우 통계청 MDIS (Micro Data Integrated Service)의 자동차주행거리통계를 활용하였다. MDIS의 자동차주행거리통계는 한국교통안전

공단에서 전국 약 1,800개 자동차검사소의 차량별·차종별 일평균 주행거리 등의 데이터를 추출하여 제공한다. 활용한 데이터 형태는 표 5와 같으며, 한국교통안전공단의 「2019 자동차주행거리통계」 연보의 자동차 주행거리 데이터와 비교검증을 수행하였다. 한편 이륜차의 일 평균 주행거리의 경우 통계자료 입수의

Table 4. Vehicle registrations by manufacturer, vehicle type, and model (Example).

Region	Manufacturer	Type	Size	Model	Less than 1 year old	...	More than 15 years old	Total
National	Total				1,700,000	...	2,800,000	23,677,000
		PC			1,400,000	...	1,850,000	19,170,000
		Van			41,000	...	132,000	827,000
		Freight			249,000	...	801,000	3,593,000
		Special			5,000	...	15,000	85,000
	***	PC	Compact	***	100	...	3,000	5,000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

*Source: KAMA, Korea Automobile Manufacturers Association

Table 5. Daily mean VKT (Example).

Classification	Vehicle type	Si (city) · Gun (county) · Gu (district)	Daily mean VKT (km)
1	PC-Standard-Compact	Jongno-gu, Seoul-si	8.28301
2	PC-Standard-Small-sized	Jongno-gu, Seoul-si	3.33155
⋮	⋮	⋮	⋮

*Source: MicroData Integrated Service, Statistics Korea (Statistics provided by Korea Transportation Safety Authority)

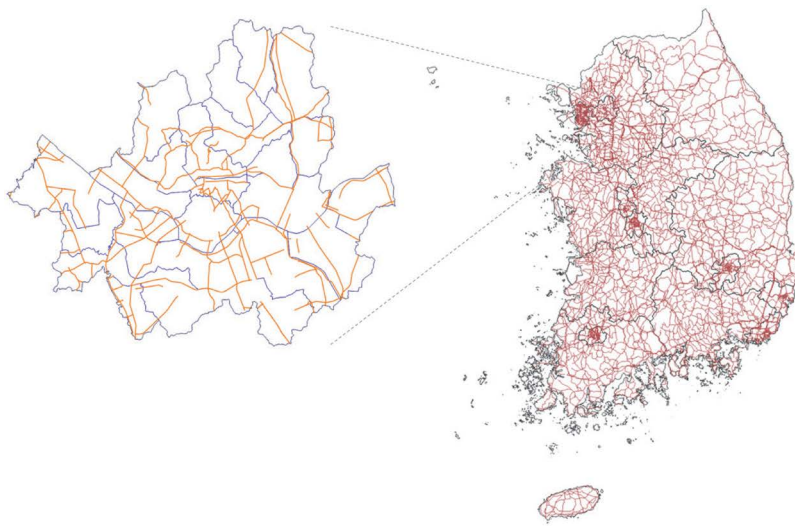


Fig. 1. National and Seoul-si measurement VKT road network in 2019.

한계로 환경부 국립환경과학원 (NIER, 2009)의 연구 결과를 활용하였다.

자동차 총 VKT는 차종별 등록대수에 주행거리를 곱하여 산정한다. 실측 VKT (관측 도로)와 비실측 VKT (비관측 도로)로 구분하여 구축하였는데, 이는 도로별 교통량은 모든 도로에 대하여 관측되지 않기 때문이다. 우선 비실측 VKT의 경우 차종별 등록대수와 일평균 주행거리의 곱으로 총 VKT (=이론적 VKT)를 산정한 후, 총 VKT와 실측 VKT의 차로 산정하였다. 실측 VKT는 실제 측정된 도로 구간별 교통량과 GIS 도면으로부터 얻을 수 있는 해당 구간의 도로별 연장의 곱으로 산정하였다(식 3).

$$VKT = \sum T \times RL \quad (\text{Eq. 3})$$

VKT: Vehicle kilometers traveled (unit · km)

T: Road Traffic (unit)

RL: Road length (km)

(Example) Capital Region First Ring Expressway

Songnae IC - Jangsu IC (January traffic volume of vehicle type A: 1,000,000 unit, Road length: 3.11 km)

$$\rightarrow VKT = 10,000,000 \times 3.11 = 3,110,000 \text{ km}$$

실측 VKT의 산정을 위해 고속국도, 일반국도 등 도로 유형별로 국토교통부, 특·광역시도 및 한국도로공사에서 실제 측정된 도로 구간별 교통량 통계를 활용

Table 6. Data obtained for measuring traffic counts.

Road type (Data provider)	Obtained data
National expressways (Korea Expressway Corporation)	- Yearbook of Road Statistics - Permanent traffic counts of national expressways - National expressways' average permanent traffic counts per days of the week - Speed limits of national expressways
National expressways, General national highways, Local highways (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport)	- Statistical Yearbook of Road Traffic Counts - Short-term statistics_Traffic counts by road type
(Seoul Metropolitan Government)	- Survey data on traffic counts of Seoul Metropolitan City (Report) - Report on the traffic speed of Seoul Metropolitan City - Survey data on monthly traffic counts
(Busan Metropolitan Government)	- Traffic Survey of Busan Metropolitan City_Traffic counts survey results (Report) - Traffic Survey of Busan Metropolitan City_Traffic speed survey results (Report) - Survey data on traffic counts
(Daegu Metropolitan Government)	- Basic Survey Related to the Traffic of Daegu Metropolitan City_Survey on traffic counts and traffic speed (Report)
(Incheon Metropolitan Government)	- Basic survey on urban traffic of Incheon Metropolitan City (Report)
(Gwangju Metropolitan Government)	- Report on the basic survey's results of Gwangju Metropolitan City's traffic
(Daejeon Metropolitan Government)	- Survey and analysis report of the traffic of Daejeon Metropolitan City
(Ulsan Metropolitan Government)	- Results of regular survey on the traffic counts and speed of Ulsan Metropolitan City (Report)
(Sejong Metropolitan Government)	- Basic survey and analysis on the traffic of Sejong Metropolitan City (Report)

하였다. 이를 위해 활용한 통계자료는 표 6과 같으며, 구축된 실측 VKT의 도로망은 그림 1과 같다.

자동차 주행속도의 경우 교통량 실측 구간에 대해서는 표 6의 각 기초자료를 기반으로 각 구간별로 실측된 차속을 기준으로 구축하였다. 교통량 실측 구간에 차속 데이터가 없는 국도 및 지방도의 경우 국가 대기오염물질 배출량 산정 방법에 따라 구간별 제한속도의 80%를 적용하며, 제한속도는 편도 1차로 60 km/h, 2차로 이상 80 km/h로 적용하였다. 비실측 구간에 대해서는 특·광역시외의 경우 외곽 평균 차속을 적용하고, 도·시의 경우 특·광역시 실측 구간 차속의 평균값을, 도·군의 경우에는 차로수에 따라 제한속도를 설정하고 제한속도의 80%를 적용하였다. 제한속도의 경우 도로의 왕복 차로 수에 따라 1차선 40 km/h, 2차선 48 km/h, 3차선 60 km/h로 가정하였다 (NAIR, 2022a).

한편 이륜차의 평균 주행속도는 환경부 국립환경과학원 (NIER, 2002)의 연구 결과를 활용하였다.

3. 연구 결과

3.1 자동차 등록대수 및 주행거리

2019년 기준 국내 자동차 및 이륜차의 총 등록대수는 25,999천 대이며, 주행거리는 총 355,284백만 km인 것으로 나타났다. 차종별 등록대수의 경우 EEA 산정 방법론에 따른 차종 분류체계를 기준으로 이륜차 (Two-wheel vehicles) 2,237천 대, 승용차 (Passenger cars) 20,239천 대, 소형 트럭 (Light-duty trucks) 및 대형 차량 (Heavy-duty vehicles) 각각 2,383천 대, 1,140천 대인 것으로 나타났다. 차종별 주행거리의 경우 이륜차 (Two-wheel vehicles) 27,181백만 km/yr, 승용차 (Passenger cars) 256,782백만 km/yr, 소형 트럭 (Light-duty trucks) 및 대형 차량 (Heavy-duty vehicles) 각각 34,897백만 km/yr, 36,425백만 km/yr인 것으로 나타났다 (표 7).

Table 7. Vehicle registrations and VKT by vehicle type in 2019.

Vehicle category	Vehicle registrations (thousands)	Vehicle speed range (km/h)	VKT (million km)
Two-wheel vehicles	2,237	28.3	27,181
Passenger cars	20,239	10~20	827
		20~30	38,368
		30~40	61,559
		40~50	39,338
		50~60	10,877
		60~70	33,981
		70~80	4,514
		80~90	67,316
		Sub total	256,782
Light-duty trucks	2,383	10~20	74
		20~30	4,485
		30~40	6,928
		40~50	7,065
		50~60	1,396
		60~70	4,807
		70~80	547
		80~90	9,594
		Sub total	34,897
Heavy-duty vehicles	1,140	10~20	40
		20~30	1,838
		30~40	3,949
		40~50	6,077
		50~60	1,293
		60~70	5,923
		70~80	697
		80~90	16,607
		Sub total	36,425
Total	25,999	–	355,284

3.2 국내 타이어 및 브레이크 마모 배출량

2019년 기준 국내 자동차 타이어 및 브레이크 마모에 의한 TSP 포함 미세먼지 배출량은 Tier 1 방법론의 경우 TSP 10,132톤, PM-10 7,994톤, PM-2.5 4,117톤으로 나타났으며, Tier 2 방법론의 경우 TSP 11,418톤, PM-10 9,046톤, PM-2.5 4,622톤으로 추정되었다 (표 8). Tier별 배출량 차이는 배출계수 및 배출량 산정 방법에 따른 차이인 것으로 분석되었다. Tier 1 방법론의 경우 차종별 주행거리에 배출계수를 적용하여 배출량을 산정한 반면, Tier 2 방법론의 경우 Tier 1 방법론에 자동차 하중 보정계수 및 차종별 평균 주행속도

Table 8. Emissions from tire and brake wear by vehicle type and methodology based on EEA's classification in 2019.

(unit: tons/yr)

Vehicle category	Tier 1 method			Tier 2 method (Tire) (Brake)					
	TSP	PM-10	PM-2.5	TSP		PM-10		PM-2.5	
Two-wheel vehicles	226	174	92	342	174 168	269	104 165	138	73 66
Passenger cars	5,880	4,725	2,388	7,130	3,374 3,756	5,705	2,024 3,681	2,882	1,417 1,465
Light-duty trucks	1,196	946	485	1,450	729 720	1,144	438 706	587	306 281
Heavy-duty vehicles	2,830	2,149	1,151	2,497	1,364 1,133	1,929	819 1,110	1,015	573 442
Total (A)	10,132	7,994	4,117	11,418	5,641 5,777	9,046	3,385 5,662	4,622	2,369 2,253
National air emissions in 2019(B)	484,527	207,866	87,618	484,527		207,866		87,618	
National air emissions in 2019 + emissions from brake and tire wear in 2019 (A + B)	494,659	215,859	91,735	495,945	490,168 490,304	216,912	211,251 213,527	92,241	89,988 89,871
Changes compared to 2019 national air emissions	2.1%	3.8%	4.7%	2.4%	1.2% 1.2%	4.4%	1.6% 2.7%	5.3%	2.7% 2.6%

를 고려한 속도 보정계수 적용에 따른 차이인 것으로 분석되었다.

EEA 차종별 배출량은 Tier 2 방법론의 PM-2.5를 기준으로 이륜차(Two-wheel vehicles) 138톤, 승용차(Passenger cars) 2,882톤, 소형 트럭(Light-duty trucks) 및 대형 차량(Heavy-duty vehicles) 각각 587톤, 1,015톤으로 승용차(Passenger cars) 부문의 타이어 및 브레이크 마모 배출량이 가장 많은 것으로 나타났다.

본 연구로 추정된 타이어 및 브레이크 마모 배출량을 국가 배출량과 합산하여 증감량을 비교하였다. 2019년 기준 국가 TSP, PM-10 및 PM-2.5 배출량은 각각 484,527톤, 207,866톤 및 87,618톤이며(NAIR, 2022b), 추정된 마모 배출량과 합산한 결과 Tier 1 방법론 기준으로 TSP 494,659톤, PM-10 및 PM-2.5 각각 215,859톤, 91,735톤으로 '19년 국가 배출량 대비 약 TSP 2.1%, PM-10 및 PM-2.5 각각 3.8%, 4.7% 증가

하는 것으로 나타났다. 반면 Tier 2 방법론 기준으로는 TSP, PM-10 및 PM-2.5 각각 495,945톤, 216,912톤 및 92,241톤으로 '19년 국가 배출량 대비 2.4% 4.4% 및 5.3% 증가하는 것으로 나타났다.

승용차 및 화물차 등 표 3의 CAPSS 자동차 분류체계 기준으로 차종별 타이어 및 브레이크 마모 배출량은 표 9와 같다. Tier 1 방법론의 PM-2.5 기준으로 승용차(1,516톤), 화물차(1,329톤), RV차(736톤) 순으로 배출량이 많은 것으로 나타났다. 반면 Tier 2 방법론 기준의 경우 승용차(1,810톤), 화물차(1,349톤), RV차(877톤) 순으로 배출량이 많은 것으로 나타났다.

3.3 국가별 타이어 및 브레이크 마모 배출량 비교

계산된 국내 타이어 및 브레이크 마모에 미세먼지 배출량을 기준으로 유럽 연합 및 주요 국가들과 비교하였다. 유럽 연합 및 국가의 경우 'Road transport' 분류 내 'Tire and Brake wear' 부문으로 타이어 및 브레이크

Table 9. Emissions from tire and brake wear by CAPSS vehicle type in 2019.

(unit: tons/yr)

CAPSS vehicle category	Tier 1 method			Tier 2 method ^(Tire) ^(Brake)					
	TSP	PM-10	PM-2.5	TSP		PM-10		PM-2.5	
Passengercars	3,734	3,000	1,516	4,478	2,132 2,346	3,578	1,279 2,299	1,810	896 915
Taxis	237	190	96	349	150 199	285	90 195	141	63 78
Vans	239	185	97	219	101 118	176	61 116	89	43 46
Buses	555	422	226	503	200 303	417	120 297	202	84 118
Freight cars	3,272	2,522	1,329	3,318	1,837 1,481	2,554	1,102 1,451	1,349	772 578
Special cars	58	44	24	38	18 20	31	11 20	16	8 8
RVs	1,812	1,456	736	2,171	1,028 1,142	1,737	617 1,119	877	432 446
Two-wheeled vehicles	226	174	92	342	174 168	269	104 165	138	73 66
Total	10,132	7,994	4,117	11,418	5,641 5,777	9,046	3,385 5,662	4,622	2,369 2,253

이크 마모 배출량을 산정하여 공개하고 있다. 2019년 기준 유럽 연합(EU, 27개국)의 PM-2.5 총 배출량은 1,358.2천 톤이며, 도로이동오염원 배출량은 118.1천 톤으로 EU 총 배출량 대비 약 8.7% 차지하는 것으로 나타났으며, 타이어 및 브레이크 마모 배출량은 35.3천 톤으로 EU 총 배출량 대비 약 2.6% 차지하는 것으로 나타났다. 같은 조건으로 비교하기 위해 본 연구로 추정된 타이어 및 브레이크 마모 배출량을 2019년 국가 배출량에 포함하여 비교한 결과, 국내 타이어 및 브레이크 마모 배출량의 경우 국가 배출량의 4.5% (Tier 1), 5.0% (Tier 2)로 EU에 비해 도로이동오염원과 마모 배출량의 국가 배출량 대비 비율이 다소 높은 것으로 나타났다(표 10).

본 연구로 산정된 타이어 및 브레이크 마모 배출량의 간접적인 정확도 평가를 위해 EEA 외 국내 연구 및 타 기관의 배출계수를 인용하여 Tier 1 방법론으로

배출량을 산정한 후 비교하였다. 국내 연구(Woo *et al.*, 2022)의 경우 소형 SUV 차량에서 배출되는 타이어 및 브레이크 마모 입자(PM-10, PM-2.5)를 측정하였으며, 이를 배출량 산정에 인용하였다. 국외 기관 배출계수의 경우 미국 캘리포니아 대기환경국(CARB, 2021; DRISI, 2017), 영국 환경청(UK EA, 2023) 및 네덜란드 환경청(PBL, 2021)의 타이어 및 브레이크 마모 배출계수를 인용하였다. 대상 차종은 본 연구에서 배출 비중이 가장 큰 ‘승용차’를 기준으로 하였으며, 하중 및 속도 보장 없이 주행거리와 배출계수만을 활용하는 Tier 1 방법론으로 배출량을 산정하였다.

배출량 산정결과, PM-2.5를 기준으로 타이어 마모와 브레이크 마모를 합한 승용차 비배기관 배출량은 360~3,458톤으로 산정되었으며, 타이어 마모 203~3,385톤, 브레이크 마모 73~375톤으로 산정되었다(표 11). EEA 배출계수를 인용한 배출량이 국내,

Table 10. PM-2.5 Emissions from tire and brake wear of Republic of Korea, EU nations and other countries in 2019.
(unit: thousand tons/yr)

Country	PM-2.5 emissions			Road (B)/ Country (A)	Wear (C)/ Country (A)
	Total of country (A)	Total of road (B)	Wear (C) (Tire + Brake)		
EU-27	1,358.2	118.1	35.3	8.7%	2.6%
Spain	161.8	15.0	3.5	9.3%	2.1%
Italy	161.5	13.5	4.7	8.4%	2.9%
France	138.5	19.5	5.4	14.1%	3.9%
Germany	97.7	18.6	7.6	19.0%	7.8%
Republic of Korea*	Tier 1	91.7	10.3	11.2%	4.5%
	Tier 2	92.2	10.8	11.7%	5.0%

*For European countries, national emissions and emissions from road transport involve emissions from tire and brake wear. Therefore, to compare the figures under the same conditions, domestic figures (emissions and ratio) include emissions from brake and tire wear emissions.

Table 11. PM emissions from tire and brake wear(passenger car) estimated respectively by applying emission factors used in each country.
(unit: tons/yr)

Country	Tire + Brake wear		Tire wear		Brake wear	
	PM-10	PM-2.5	PM-10	PM-2.5	PM-10	PM-2.5
EEA (This study)	3,000	1,516	—	—	—	—
KOREA ¹⁾	1,842	587	1,288	212	554	375
CARB ²⁾	1,586	360	811	203	775	157
United Kingdom ³⁾	1,337	819	946	662	391	157
Netherlands ⁴⁾	17,415	3,458	16,925	3,385	489	73

*Source: ¹⁾Woo *et al.*, 2022. Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles:

An experimental analysis

²⁾CARB, 2021. EMFAC2021 Volume III Technical Document DRISI, 2017. Brake Wear Emissions in Particulate Matter

³⁾UK EA, 2023. UK Informative Inventory Report

⁴⁾PBL, 2021. Methods for Calculating the Emissions of Transport in the Netherlands

CARB 및 영국의 배출계수를 인용한 배출량보다 다소 높게 산정되는 것으로 나타났다. 배출량 차이의 주된 원인인 배출계수의 경우 타이어 종류(여름, 겨울 및 사계절용 등), 실험 시 도로유형 및 기후조건, 차량 중량 등 실험 조건에 따라 타이어 마모 배출계수 편차가 달라질 수 있다(Liu *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2020). 또한 한국, 미국 및 일본 등에서 주로 사용되며 소음과 마모율이 낮은 비석면계 유기형 패드(NAO, Non-Asbestos Organic)와 유럽에서 주로 사용되며 제동력과 마모율이 높은 저금속형(LM, Low-metallic) 등 브레이크 패드 종류 및 실험 조건에 따라 브레이크 마모 배출계수가 달라질 수 있다(Woo *et al.*, 2022; Sinha *et al.*, 2020). 이에 다양한 차종과 국내 현실을 반영할 수

있는 배출계수 개발을 위한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.4 연도별 타이어 및 브레이크 마모 배출량 추세 분석

본 연구의 Tier 2 방법론을 기준으로 2015년부터 2019년까지 타이어 및 브레이크 마모 PM-2.5 배출량을 시산한 후, 연도별 자동차(이륜차 제외) 부문 PM-2.5 배출량과 국내 자동차 등록 추이를 비교하였다(표 12). 연도별 자동차 타이어 및 브레이크 마모 배출량 추정 결과(이륜차 제외), 국내 자동차 VKT 증가 등에 따라 2015년 4,009톤에서 2019년 4,484톤으로 증가한 것으로 나타났다. 2018년 대비 2019년 마모 배

출량의 경우 약 142톤 감소하였는데, 이는 ‘소형 트럭 (Light-duty trucks)’ 및 ‘대형 차량 (Heavy-duty vehicles)’ 차종의 VKT 감소에 따른 것으로 나타났다. 반면 승용차 및 화물차 등 자동차 배기관에 의한 국가 PM-2.5 배출량의 경우 (이륜차 제외) 앞서 친환경차 증가와 더불어 제작차·운행차 배출규제 강화, 노후 경유차 감소에 따른 신차 대체 효과 등에 따라 2015년 8,817톤에서 2019년 6,107톤으로 점차 줄어드는 추세인 것으로 조사되었다(NAIR, 2022b).

국내 자동차 총 등록대수의 경우 2015년 21,069천대에서 2019년 23,762천 대로 지속적으로 증가하는 추세인 것으로 나타났으며, 친환경 자동차(하이브리드차(HEV), 전기차(EV), 수소차(HFCEV)) 또한 2015년 178천대에서 2019년 595천 대로 증가하는 추세인 것으로 나타났다. 친환경 자동차 등록대수의 경우 '16년부터 '19년까지 전년 대비 평균 약 35%씩 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다.

일반적으로 내연기관 자동차와 친환경 자동차의 경

Table 12. Exhaust·non-exhaust(wear) national PM-2.5 emissions from automobiles and the number of registered automobiles between 2015 and 2019. (unit: tons/yr, thousand unit)

Category	2015	2016	2017	2018	2019
Vehicles emission (Exhaust, two-wheeled vehicles not included)	8,817	9,677	8,642	8,075	6,107
Vehicles wear emission (Non-exhaust, two-wheeled vehicles not included)	4,009	4,218	4,561	4,626	4,484
Number of registered vehicles	21,069	21,888	22,615	23,289	23,762
Green vehicles (HEV + EV + HFCEV)	178	242	336	457	595

*Source: KAMA, Korea Automobile Manufacturers Association
National Air Emission Inventory and Research Center, Ministry of Environment

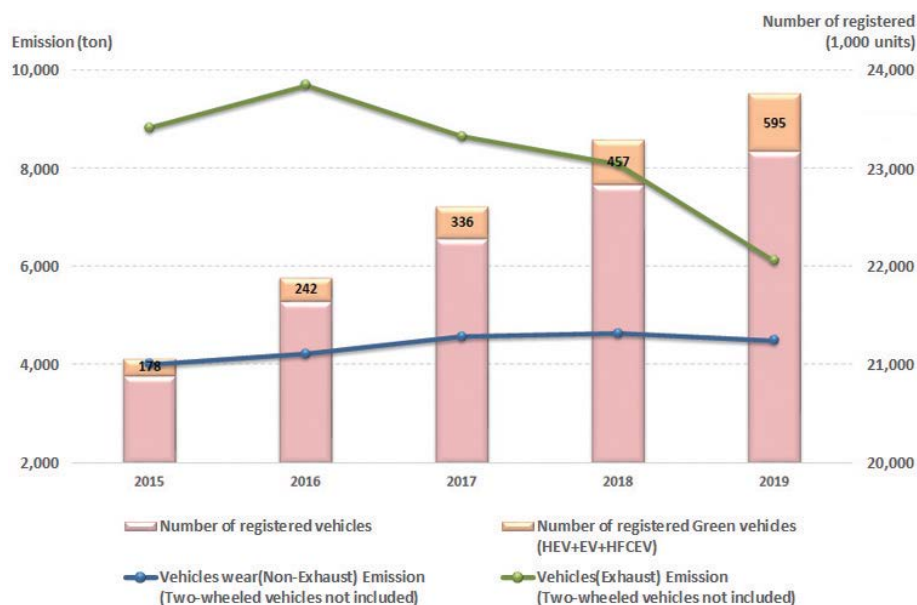


Fig. 2. Exhaust-non-exhaust (wear) national PM-2.5 emissions from automobiles and the number of registered automobiles between 2015 and 2019.

우 배터리 등에 의한 중량 차이에 의해 비배기관 배출 특성이 다르다(EEA, 2022; Jeoung *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021). 2019년 기준 국내 자동차 총 등록대수의 약 2.5% 수준인 친환경 자동차가 지속적으로 증가하고, 자동차 배출가스 규제가 강화될수록 배기관에 의한 국가 미세먼지 배출량은 감소하고, 비배기관에 의한 배출량은 증가하는 추세를 지속적으로 나타낼 수 있다. 이에 자동차 부문 국가 미세먼지 배출 저감을 위해서는 배기관과 더불어 비배기관에 의한 배출 관리 또한 필요할 것으로 판단된다(그림 2).

4. 결 론

정부는 ‘미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법’을 근거로 ‘미세먼지 관리 종합계획(이하 종합계획)’을 수립하였다. 종합계획은 ‘산업’, ‘발전’, ‘수송’ 및 ‘농업·생활’ 각 부문별로 미세먼지 저감을 위한 대책을 수립하였으며, ‘수송’ 부문의 경우 노후 경유차 조속 퇴출과 저공해차 보급 확대 추진 등의 내용을 담고 있다. 이와 같이 전기·수소 등 친환경 연료전환을 통한 저감 대책이 확대되면서 연료 연소에 의한 배기구의 배출량보다 타이어 및 브레이크 마모 등 비배기관 배출의 관심이 높아지고 있다. 그러나 현재 비배기관에 의한 배출량은 국가 대기오염물질 배출량 통계에 누락되어 있는 등 정확한 배출 실태를 파악하고 있지 못하는 실정이다.

본 연구에서는 현재 국가 대기오염물질 배출량 통계에 누락되어 있는 자동차 타이어 및 브레이크 마모에 의한 TSP, PM-10 및 PM-2.5 배출량을 유럽 EEA의 배출량 산정 방법론에 따라 자동차 주행거리를 기반으로 추정하였다. 2019년 기준 국내 자동차 타이어 및 브레이크 마모에 의한 TSP를 포함한 미세먼지 배출량은 Tier 1 방법론의 경우 TSP 10,132톤, PM-10 7,994톤, PM-2.5 4,117톤으로 나타났으며, Tier 2 방법론의 경우 TSP 11,418톤, PM-10 9,046톤, PM-2.5 4,622톤으로 산정됐다. CAPSS 자동차 분류체계 기준

차종별 PM-2.5 배출량은 Tier 1 방법론 토대로 승용차(1,516톤), 화물차(1,329톤), RV차량(736톤) 순으로 배출량이 많은 것으로 나타났다. 반면 Tier 2 방법론 기준의 경우 승용차(1,810톤), 화물차(1,349톤), RV차량(877톤) 순으로 배출량이 많은 것으로 나타났다.

산정된 타이어 및 브레이크 마모 배출량을 2019년 기준 국가 배출량과 합산한 결과, Tier 1 방법론 기준으로 TSP 494,659톤, PM-10 및 PM-2.5 각각 215,859톤, 91,735톤으로 국가 배출량 대비 약 TSP 2.1%, PM-10 및 PM-2.5 각각 3.8%, 4.7% 증가하는 것으로 나타났다. Tier 2 방법론 기준으로는 TSP, PM-10 및 PM-2.5 각각 495,945톤, 216,912톤 및 92,241톤으로 국가 배출량 대비하여 2.4%, 4.4% 및 5.3% 증가하는 것으로 나타났다.

연도별 이륜차를 제외한 자동차 배기관에 의한 국가 PM-2.5 배출량의 경우 2015년 8,817톤에서 2019년 6,107톤으로 점차 줄어드는 추세인 것으로 조사되었다. 그러나 타이어 및 브레이크 마모 등 자동차 비배기관에 의한 PM-2.5 배출량의 경우, 2015년 4,009톤에서 2019년 4,484톤으로 증가하는 추세인 것으로 나타났다. 자동차 배출규제 강화와 더불어 친환경 자동차 등록대수가 지속적으로 증가할 경우 자동차 배기관에 의한 국가 미세먼지 배출량은 감소하고, 비배기관에 의한 배출량은 증가하는 추세를 지속적으로 나타낼 수 있다. 이에 자동차 부문 국가 미세먼지 배출 저감을 위해서는 배기관과 더불어 비배기관에 의한 배출 관리 또한 필요할 것으로 판단된다.

본 연구로 비배기관에 의한 국내 미세먼지 배출 현황을 파악하고, 배기관에 의한 배출과 더불어 비배기관에 의한 배출 관리를 위한 정책 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 보다 정확한 배출량 산정을 위해서는 자동차 강우 등 다양한 영향 인자를 고려하여 국내 현실을 반영할 수 있는 배출계수 및 산정 방법론 개발 등의 지속적인 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 경사도 등의 도로 유형과 가속 및 감속 등의 주행 패턴에 따라 오염물질 배출 정도가 다를 수 있을 때, 실도로 배출 특성을 반영할 수 있도록 국내 자동차 배출량 산정 방법 개선이 필요하다.

References

- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Friederike, S., Reifferscheid, G. (2020) Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment, *Science of The Total Environment*, 773, 137823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823>
- Borken-Kleefeld, J., Ntziachristos, L. (2012) The potential for further controls of emissions from mobile sources in Europe, DG-Environment of the European Commission, TSAP #4. <https://pure.iiasa.ac.at/10161>
- California Air Resources Board (CARB) (2021) EMFAC 2021 Volume III Technical Document. [https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/mobile-source-emissions-inventory/msei-modeling-tools-emfac-software-and CARB](https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/mobile-source-emissions-inventory/msei-modeling-tools-emfac-software-and-CARB)
- Cassee, F., Héroux, M.-E., Gerlofs-Nijland, M., Kelly, F. (2013) Particulate matter beyond mass: recent health evidence on the role of fractions, chemical constituents and sources of emission, *Inhalation Toxicology*, 25(14), 802-812. <https://doi.org/10.3109/08958378.2013.850127>
- Choi, S.-W., Kim, T., Lee, H.-K., Kim, H.-C., Han, J., Lee, K.-B., Lim, E.-H., Shin, S.-H., Jin, H.-A., Choi, E., Kim, Y.-M., Yoo, C. (2020) Analysis of the National Air Pollutant Emission Inventory (CAPSS 2016) and the Major Cause of Change in Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 14(4), 422-445. <https://doi.org/10.5572/ajae.2020.14.4.422>
- Choi, S.-W., Bae, C.-H., Kim, H.-C., Kim, T., Lee, H.-K., Song, S.-J., Jang, J.-P., Lee, K.-B., Choi, S.-A., Lee, H.-J., Park, Y., Park, S.-Y., Kim, Y.-M., Yoo, C. (2021) Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2017) Data and Assessment of Emissions based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 15(4), 2021064. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.064>
- Choi, S.-W., Cho, H., Hong, Y., Jo, H.-J., Park, M., Lee, H.-J., Choi, Y.-J., Shin, H.-H., Lee, D., Shin, E., Baek, W., Park, S.-K., Kim, E., Kim, H.-C., Song, S.-J., Park, Y., Kim, J., Baek, J., Kim, J., Yoo, C. (2022) Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2018) Data and Assessment of Emissions Based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16(4), 2022084. <https://doi.org/10.5572/ajae.2022.084>
- Choi, Y.-J., Kim, Y.-P. (2022) A Study on Ammonia and Non-Exhaust Dust Emissions from On-Road Vehicles, *Seoul Studies*, 23(1), 89-104, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.23129/seouls.23.1.20220387>
- Division of Research, Innovation and System Information (DRISI) (2017) Brake Wear Emissions in Particulate Matter. <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/preliminary-investigations/brake-wear-emissions-pi-a11y.pdf>
- EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 (EEA) (2022) 1.A.3.b.vi-vii Road transport: Automobile tyre and brake wear 2022. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-vi/view>
- Grigoratos, T., Martini, G. (2014) Brake wear particle emissions: a review, *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 2491-2504. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0463-7>
- Harrison, R., Allanm, J., Carruthers, D., Heal, M., Lewis, A., Marnier, B., Murrells, T., Williams, A. (2021) Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review, *Atmospheric Environment*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118592>
- Jeoung, S., Ko, Y., Lee, P.-C. (2021) Trends in Reduction Technology of Particulate Matter Emitted from Automotive Non-Exhaust Components, *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 43(7), 61-64.
- Kang, T.-W., Kim, H.-J. (2021) A Basic Study on the Generation of Tire & Road Wear Particles by Differences in Tire Wear Performance, *Korean Recycled Construction Resources Institute*, 9(4), 561-568, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14190/JRCR.2021.9.4.561>
- Kang, T.-W., Kim, H.-J. (2022) A Study on the Collection and Analysis of Tire and Road Wear Particles (TRWPs) as Fine Dust Generated on the Roadside, *Korean Recycled Construction Resources Institute*, 10(3), 293-299, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14190/JRCR.2022.10.3.293>
- Leads, R., Weinstein, J. (2019) Occurrence of tire wear particles and other microplastics within the tributaries of the Charleston Harbor Estuary, South Carolina, USA, *Marine Pollution Bulletin*, 145, 569-582. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.061>
- Lee, H., Ju, M., Kim, Y. (2020) Estimation of emission of tire wear particles (TWPs) in Korea, *Waste Management*, 108, 154-159. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.037>
- Liu, Y., Chen, H., Gao, J., Li, Y., Dave, K., Chen, J., Federici, M., Perricone, G. (2021) Comparative analysis of non-exhaust

- airborne particles from electric and internal combustion engine vehicles, *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126626. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126626>
- Liu, Y., Chen, H., Wu, S., Gao, J., Li, Y., An, Z., Mao, B., Tu, R., Li, T. (2022) Impact of vehicle type, tyre feature and driving behaviour on tyre wear under real-world driving conditions, *Science of The Total Environment*, 842, 156950. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156950>
- Mathissen, M., Scheer, V., Kirchner, U., Vogt, R., Benter, T. (2012) Non-exhaust PM emission measurements of a light duty vehicle with a mobile trailer, *Atmospheric Environment*, 59, 232-242. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.020>
- Ministry of Environment (MOE) (2019) Comprehensive plan for fine dust management.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2022a) Handbook of estimation methods for national air pollutant emissions V. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=8&articleId=238&boardId=8&menuId=49¤tPageNo=1>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2022b) 2019 National air pollutant emissions. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=7&articleId=145&boardId=7&menuId=48¤tPageNo=1>
- National Institute of Environmental Research Center (NIER) (2002) A Study on the Evaluation of Motorcycle Exhaust Emission (II). <https://library.me.go.kr/#/search/detail/65424>
- National Institute of Environmental Research Center (NIER) (2009) A study on the Estimation of PM_{2.5} Emission Characteristics and Contributions. <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201300007897>
- National Institute of Environmental Research Center (NIER) (2019) Standard operations procedure for the construction of supporting data for national air pollutant emissions. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=8&articleId=89&boardId=8&menuId=49¤tPageNo=1>
- PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL) (2021) Methods for Calculating the Emissions of Transport in the Netherlands. <https://www.pbl.nl/en/publications/methods-for-calculating-the-emissions-of-transport-in-the-netherlands-2021>
- Sinha, A., Ischia, G., Menapace, C., Cialanella, S. (2020) Experimental Characterization Protocols for Wear Products from Disc Brake Materials, *Atmosphere*, 11(10), 1102. <https://doi.org/10.3390/atmos11101102>
- Son, B., Hwang, K.-S. (2021) A Study on the Characteristics of Scattering Dust Generated from Automobile Brake Pads, *The Korean Society Of Automotive Engineers*, 29(2), 165-172, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7467/KSAE.2021.29.2.165>
- Timmers, V., Achten, P. (2016) Non-exhaust PM emissions from electric vehicles, *Atmospheric Environment*, 134, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017>
- U.K. Air Quality Expert Group (UK AQEG) (2019) Non-Exhaust Emissions from Road Traffic. https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/1907101151_20190709_Non_Exhaust_Emissions_typeset_Final.pdf
- U.K. Environment Agency (UK EA) (2023) UK Informative Inventory Report. https://naei.beis.gov.uk/reports/reports?report_id=1109
- Woo, S.-H., Kim, Y., Choi, Y., Lee, S., Lee, S. (2020) Measuring Method of Non-exhaust PM Generated by Brake Wear, *The Korean Society of Automotive Engineers*, 28(10), 701-710, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7467/KSAE.2020.28.10.701>
- Woo, S.-H., Jang, H., Lee, S.-B., Lee, S. (2022) Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles: An experimental analysis, *Science of The Total Environment*, 842, 156961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156961>
- Yeo, S.-Y., Lee, H.-K., Choi, S.-W., Seol, S.-H., Jin, H.-A., Yoo, C., Kim, J.-H., Kim, J.-S. (2019) Analysis of the National Air Pollutant Emission Inventory (CAPSS 2015) and the Major Cause of Change in Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 13(3), 212-231. <https://doi.org/10.5572/ajae.2019.13.3.212>
- Zhao, J., Lewinski, N., Riediker, M. (2015) Physico-Chemical Characterization and Oxidative Reactivity Evaluation of Aged Brake Wear Particles, *Aerosol Science and Technology*, 49, 65-74. <https://doi.org/10.1080/02786826.2014.998363>

Authors Information

- 최성우 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)
(csw513@korea.kr),
- 최수아 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)
(suachoi@korea.kr),
- 이향경 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구사)
(leehk0803@korea.kr),
- 유 철 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 팀장)
(s7424yoo@korea.kr)